RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

L'ÉCHAUFFEMENT DE L'AIR

PARCOURANT UN TUYAU MAINTENU EXTÉRIEUREMENT A UNE TEMPÉRATURE DÉTERMINÉE

APPLICATION A L'ÉTUDE DE LA POSSIBILITÉ DE LA TRANSFORMATION DE LA LOCOMOTIVE EN MACHINE A CONDENSATION

Par M. CARCANAGUES, Ingénieur des mines,
Ingénieur principal de la traction de la Cie des ch. de fer P.-L.-M.

But des recherches. — Le bénéfice de la condensation de la vapeur d'échappement a été jusqu'ici réservé aux machines fixes et aux machines marines, en raison de l'impossibilité, au point de vue économique, de faire accompagner les machines montées sur roues de la masse d'eau nécessaire.

Cette difficulté n'existerait plus s'il était pratiquement possible d'employer comme réfrigérant l'air au lieu de l'eau.

Une locomotive qui serait munie d'un condenseur à air se trouverait dans le cas d'une machine de bateau qui trouve toujours à sa proximité l'eau nécessaire au fonctionnement de son condenseur. Il est clair que, si l'on reçoit la vapeur d'échappement d'une machine dans un espace traversé par un faisceau tubulaire dans lequel cir-

cule de l'air pris dans l'atmosphère ambiante, cette vapeur se refroidira de toute la chaleur emportée par l'air qui sortira échauffé du faisceau.

En multipliant le nombre des tubes et leur donnant une longueur suffisante, on devra arriver, ce n'est pas douteux, à refroidir à la température que l'on désirera (en restant, bien entendu, au-dessus de la température ambiante) toute la vapeur d'échappement d'une machine quelconque.

Une telle solution peut-elle être appliquée pratiquement aux machines locomotives? C'est le point que l'on s'est proposé d'examiner dans la présente note (*).

On se rend compte immédiatement qu'en raison de la très faible capacité calorifique de l'air, il en faudra un énorme volume pour ramener à l'état d'eau à 50 ou 60°, ou même à 100°, la vapeur d'échappement d'une machine aussi puissante qu'une locomotive.

Quelles dimensions se verra-t-on obligé de donner au faisceau tubulaire pour multiplier suffisamment la surface de contact de la vapeur avec les parois réfrigérantes?

Quelle force faudra-t-il mettre en jeu pour contraindre l'air à parcourir avec une vitesse suffisante ledit faisceau?

Tels sont les points qu'il convient d'examiner avant de se prononcer sur la possibilité ou l'impossibilité d'appliquer la condensation aux locomotives.

Il est clair qu'un calcul facile permettrait de répondre immédiatement à la première de ces deux questions si l'on connaissait la formule représentant la loi suivant laquelle se fait l'échauffement de l'air qui parcourt un

---

(*) On construit, sous le nom d'*aéro-condenseurs*, des condenseurs pour machines fixes, dans lesquels l'air est employé comme réfrigérant.

L'air échauffé peut servir à la ventilation et au chauffage des ateliers, ou être utilisé pour le séchage.

(Voir HATON DE LA GOUPILLIÈRE, *Cours de machines*, 1233).

tube métallique maintenu extérieurement à une température déterminée.

Cette loi ne nous étant pas connue, c'est à l'expérience directe que nous avons pensé qu'il convenait d'avoir recours pour y suppléer.

Nous avons donc fait passer, à différentes vitesses, de l'air pris dans l'atmosphère et, par suite, de température connue, dans des tubes métalliques de longueurs et de diamètres variés et portés extérieurement à différentes températures également connues, et nous avons mesuré la température de cet air à la sortie des tubes.

Avant de faire connaître les résultats obtenus, nous décrirons sommairement les appareils qui ont été installés aux ateliers de la Compagnie P.-L.-M., à Paris, pour ces expériences (Pl. XV).

Description des appareils d'expérience. — L'air, fourni par un ventilateur, était amené par une canalisation spéciale dans une boîte en bois A munie d'une vanne V manœuvrée à la main et permettant d'en régler l'accès dans les appareils d'expérience.

De l'une des parois de cette boîte partait un faisceau de cinq tubes en verre de $0^m,60$ de longueur et des cinq diamètres différents : 2, 4, 5, 7 1/2 et 10 centimètres mesurés à l'intérieur. Ces tubes de verre venaient se raccorder à des tubes de laiton, des mêmes diamètres intérieurs, traversant de part en part une caisse en tôle B remplie d'eau, qu'une arrivée de vapeur permettait de porter à telle température qu'on pouvait désirer, sans dépasser toutefois 100°. Enfin, ces tubes de laiton étaient à leur tour continués par de nouveaux tubes de verre, toujours des mêmes diamètres, rejetant l'air échauffé en dehors de la salle.

La longueur des tubes de laiton était de $1^m,500$, mais deux autres caisses semblables avaient été préparées,

comportant des tubes de 1 mètre et de $0^m,500$, de telle façon que les expériences portassent sur trois longueurs de tubes différentes.

La température de l'air avant son passage dans les tubes était donnée par le thermomètre *a*; celle de l'air échauffé se lisait sur les thermomètres *c* assujettis par des bouchons en caoutchouc dans des tubulures spéciales, et fixés de telle façon que leurs réservoirs fussent sensiblement au milieu du rayon supérieur des tubes, cette position ayant été reconnue, par des expériences préliminaires, comme donnant sensiblement la température moyenne de l'air, dont les couches les plus élevées étaient toujours plus chaudes que les autres.

La température de l'eau de la caisse B était donnée par deux thermomètres *b*; un agitateur à palettes avait pour fonction d'assurer l'uniformité de cette température dans toute la masse.

Quant à la vitesse de l'air dans les tubes, elle n'a pas été mesurée directement; on l'a calculée au moyen de la formule de d'Aubuisson (PÉCLET, *Traité de la chaleur*, liv. II, chap. V, 422) :

$$V = \sqrt{\frac{2gP}{1 + \frac{KL}{D}}},$$

formule qui donne la vitesse V, en mètres par seconde, de l'air qui parcourt un tube cylindrique, en fonction de la longueur L et du diamètre D de ce tube exprimés en mètres, en même temps que de la différence P (exprimée en mètres de hauteur d'air) des pressions dans le tube et à l'extérieur.

Pour l'application de cette formule à nos expériences, L et D étaient connus; quant à P, on le déduisait, par un calcul facile, de la pression de l'air dans la boîte A, donnée par un manomètre à eau *m*; enfin, K est un coeffi-

cient constant égal à 0,024, et g est l'intensité de la pesanteur = 9,8088.

J'ajouterai qu'afin d'éviter toute contraction de la veine d'air à l'entrée des tubes, ceux-ci étaient évasés comme le montre le dessin ; cette précaution nous a permis de faire entrer dans la formule ci-dessus le véritable diamètre intérieur des tubes, et non une valeur correspondant à une section rétrécie de la veine.

Conduite des expériences. — Voici maintenant comment les expériences ont été conduites. Chacune d'elles a consisté :

1° A porter à 100° la température de l'eau contenue dans la caisse B, en même temps que l'on faisait circuler dans les tubes un courant d'air sous l'influence d'une pression déterminée qu'il était facile d'obtenir en ouvrant convenablement la vanne V ;

2° Une fois le régime, tant des vitesses de l'air que de sa température dans les cinq tubes, bien établi, à fermer l'arrivée de la vapeur qui maintenait à 100° l'eau de la caisse B, et à lire dès lors, de dix en dix minutes :

1° La température initiale de l'air sur le thermomètre a ;

2° Sa pression au-dessus de celle de l'atmosphère, sur le manomètre à eau m ;

3° La température de l'eau (maintenue en agitation) de la caisse B, sur les thermomètres b ;

4° La température de l'air échauffé sur chacun des thermomètres c.

Le nombre des expériences a été de vingt-deux.

Huit ont été faites avec la caisse à eau chaude de $1^{m},500$, sous des charges de 76, 66, 56, 46, 36, 26, 16 et 6 millimètres d'eau, l'air parcourant une longueur de tubes de 3 mètres, dont moitié soumise à l'échauffement ;

Sept ont été faites avec la caisse à eau chaude de

1 mètre sous des charges de 66, 56, 46, 36, 26, 16 et 6 millimètres d'eau;

Sept autres, enfin, ont été faites avec la caisse à eau chaude de $0^m,500$ sous des charges de 66, 56, 46, 36, 26, 16 et 6 millimètres d'eau.

Résultats des expériences. — Les résultats des lectures pour chaque expérience ont été consignés sur des tableaux dont je donne ci-après un spécimen :

N° 5. — LONGUEUR DE TUBE SOUMISE A L'ÉCHAUFFEMENT : $1^m,500$.

HEURES	TEMPÉRATURE INITIALE de l'air θ	CHARGE en millimètres d'eau	TEMPÉRATURE de l'eau chaude T	TEMPÉRATURE DE L'AIR A LA SORTIE t ÉCHAUFFEMENT CORRESPONDANT $t-\theta$									
				$D = 0^m,02$		$D = 0^m,04$		$D = 0^m,05$		$D = 0^m,075$		D = [illegible]	
				t	$t-\theta$	t	$t-\theta$	t	$t-\theta$	t	$t-\theta$	t	
$1^h,30$	20,3	36 »	100 »	72,2	51,9	51 »	30,7	43,5	23,2	34,2	13,9	30,2	[illegible]
$1^h,40$	20,2	35,6	96,9	70,6	50,4	50,3	30,1	43,3	23,1	34,2	14 »	30,1	[illegible]
$1^h,50$	20,3	36,1	93,8	68,4	48,1	49 »	28,7	42,4	22,1	33,5	13,2	29,8	[illegible]
2^h »	20,3	37 »	90,8	66,7	46,4	47,8	27,5	41,3	21 »	33 »	12,7	29,4	9.[illegible]
$2^h,10$	20,6	37 »	87,9	64,5	43,9	46,7	26,1	40,5	19,9	32,4	11,8	29,3	8[illegible]
$2^h,20$	20,7	36 »	85,2	63,1	42,4	46 »	25,3	40 »	19,3	32,2	11,5	28,7	8[illegible]
$2^h,30$	20,8	36 »	82,9	61,7	40,9	45 »	24,2	39,5	18,7	32 »	11,2	28,3	7,[illegible]
$2^h,40$	20,8	35,9	80,4	60,2	39,4	44,1	23,3	38,5	17,7	31,4	10,6	28,3	7,[illegible]
$2^h,50$	20,9	35,3	78,3	58,7	37,8	43,2	22,3	37,8	16,9	31,1	10,2	28 »	7,[illegible]
3^h »	21 »	35,1	76,2	57,3	36,3	42,5	21,5	37,5	16,5	31 »	10 »	27,8	6,[illegible]
$3^h,10$	21 »	36,5	74,1	56 »	35 »	41,6	20,6	36,8	15,8	30,4	9,4	27,7	6,[illegible]
$3^h,20$	21,1	36,2	72,1	54,6	33,5	40,9	19,8	36,4	15,3	30,1	9 »	27,5	6,[illegible]
$3^h,30$	21,1	35,9	70,3	53,5	32,4	40,1	19 »	35,7	14,6	29,9	8,8	27,3	6,[illegible]
$3^h,40$	21,2	35 »	68,5	52,2	31 »	39,7	18,5	35,2	14 »	29,3	8,1	27,1	5,[illegible]
$3^h,50$	21,2	36,4	66,8	51,1	29,9	38,8	17,6	34,8	13,6	29,3	8,1	26,9	5,[illegible]
4^h »	21,2	36,1	65,2	50 »	28,8	38,2	17 »	34,3	13,1	29 »	7,8	26,8	5,[illegible]
$4^h,10$	21,3	37,1	63,5	48,9	27,6	37,4	16,1	33,8	12,6	28,7	7,4	26,5	5,[illegible]
$4^h,20$	21,3	35 »	62 »	48 »	26,7	37,1	15,8	33,5	12,2	28,6	7,3	26,5	5,2

Les vingt-deux tableaux établis sur le modèle du spécimen qui précède eussent été incommodes à consulter; il y entre, d'ailleurs, un élément appelé à disparaître, c'est le temps; en outre, les chiffres fournis par les lectures avaient besoin de corrections, tant en raison des erreurs inévitables d'observation que du manque de constance de la température et de la pression initiales de l'air.

Voici comment ces corrections ont été faites :

Il a d'abord été établi vingt-deux nouveaux tableaux donnant les valeurs de l'échauffement de l'air (élément $t - \theta$ du tableau spécimen précédent) correspondant à des valeurs de T (température de l'eau chaude) variant de 5° en 5° depuis 100° jusqu'à 65°. Ces valeurs ont été obtenues par interpolation, procédé de calcul d'autant mieux justifié dans la circonstance qu'il a été reconnu que les courbes $f(T, t - \theta) = o$ correspondant à une même expérience se rapprochaient beaucoup d'une ligne droite. Les valeurs correspondantes de l'élément h (charge en millimètres d'eau) ont été également déterminées par interpolation.

On n'a plus conservé sur ces nouveaux tableaux (dont ci-après également un spécimen se rapportant à la même expérience n° 5) que les valeurs de $t - \theta$, ce qui a permis de se débarrasser de l'élément θ, qu'on a supposé constant et égal à 20°, chiffre dont il s'est, en fait, peu écarté pendant les expériences. L'adoption d'une valeur fixe pour θ était, d'ailleurs, justifiée par cette considération qu'une légère variation de cet élément ne peut sensiblement influer sur la différence $t - \theta$.

N° 5. — LONGUEUR DE TUBE SOUMISE A L'ÉCHAUFFEMENT : $1^m,500$.

CHARGE en millimètres d'eau h	TEMPÉRATURE de l'eau chaude T	ÉCHAUFFEMENT $t - \theta$ DE L'AIR PASSANT DANS LES TUBES EN LAITON DES DIAMÈTRES				
		$0^m,02$	$0^m,04$	$0^m,05$	$0^m,075$	$0^m,10$
36 »	100	51,9	30,7	23,2	13,9	9,9
35,9	95	49 »	29,3	22,5	13,5	9,7
37 »	90	45,6	27,1	20,7	12,4	9 »
36 »	85	42,2	25,2	19,2	11,5	7,9
35,8	80	39,1	23,1	17,5	10,5	7,4
35,9	75	35,5	20,8	16,1	9,6	6,7
35,9	70	32,1	18,9	14,5	8,7	6,2
36,2	65	28,7	16,9	13 »	7,8	5,6

Avec les éléments de ces nouveaux tableaux on a pu

construire les courbes $\varphi\ (h,\ t - \theta) = 0$, chacune d'elles correspondant à une valeur déterminée de T, en même temps qu'à un tube donné de diamètre et de longueur; il a été reconnu, comme il était facile de s'y attendre, que ces courbes présentaient de légères irrégularités de forme dues, comme il a été dit plus haut, tant aux légères erreurs d'expérimentation qu'au manque de constance des éléments θ et h; il était rationnel de modifier légèrement ces courbes de manière à leur rendre, autant que possible, la continuité qui leur manquait; cela fait, on a alors pu relever sur chacune d'elles les valeurs de $t - \theta$ correspondant à des vitesses de l'air variant de 5 en 5 mètres, vitesses dont les valeurs sont reliées à la variable h par la formule citée plus haut (page 532) en même temps que par la relation :

$$h = \frac{P \times 0{,}0013}{1 + 20 \times 0{,}00367}.$$

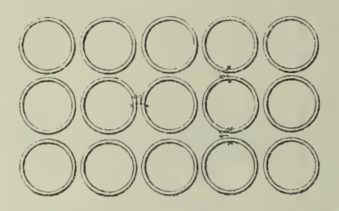
C'est ainsi qu'a été obtenu le relevé reproduit ci-après qui donne, pour chacune des trois longueurs de $1^{m},500$, 1 mètre et $0^{m},500$ combinées avec chacun des cinq diamètres de 100, 75, 50, 40 et 20 millimètres, l'échauffement de l'air circulant aux vitesses de 10, 15, 20 ou 25 mètres par seconde, dans un tube soumis extérieurement à une température variant de 65 à 100°.

TABLEAU A.

Tableau donnant l'élévation de température ($t - \theta$) que subit l'air en passant dans des tubes en laiton de différentes longueurs et de différents diamètres, chauffés extérieurement à des températures T variant de 65° à 100°.

DIAMÈTRES des tubes	VITESSE D'ÉCOULEMENT de l'air dans les tubes	AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE $t - \theta$ ACQUISE PAR L'AIR A LA SORTIE DES TUBES LORSQUE CEUX-CI SONT CHAUFFÉS A UNE TEMPÉRATURE DE :																							
		100°	95°	90°	85°	80°	75°	70°	65°	100°	95°	90°	85°	80°	75°	70°	65°	100°	95°	90°	85°	80°	75°	70°	65°
		Tubes de 1m,500 de longueur.								*Tubes de 1m,000 de longueur.*								*Tubes de 0m,500 de longueur.*							
	mètres																								
0m,100	10	12,2	11,4	10,5	9,7	8,9	8,2	7,3	6,5	8,6	7,8	7,3	6,7	6 »	5,6	5 »	4,3	4,5	4,2	3,9	3,6	3,3	3,1	2,7	2,3
	15	10,7	10 »	9,1	8,5	7,6	7 »	6,4	5,8	7,6	7,1	6,5	6,1	5,5	4,9	4,4	3,8	3,8	3,6	3,3	3 »	2,7	2,5	2,2	1,9
	20	9,8	9,3	8,5	7,9	7,2	6,6	6 »	5,2	6,8	6,3	5,7	5,3	4,9	4,4	4 »	3,5	3,4	3,2	3 »	2,7	2,4	2,2	2 »	1,8
	25	9,6	8,9	8,2	7,6	7 »	6,5	5,8	5,1	6,5	6,1	5,6	5,1	4,5	4 »	3,5	3 »	3,4	3,2	3 »	2,7	2,4	2,2	2 »	1,7
0m,075	10	17,1	16 »	14,8	13,7	12,5	11,3	10,2	9,2	12,5	11,5	10,6	9,7	8,8	8 »	7,2	6,5	7,3	6,9	6,5	6 »	5,5	5 »	4,5	3,9
	15	14,8	13,5	12,6	11,8	10,6	9,8	9 »	8 »	11 »	10,3	9,5	8,8	8 »	7,1	6,4	5,7	6,1	5,8	5,5	5 »	4,5	4 »	3,7	3,2
	20	13,4	12,6	12 »	11,1	10,1	9,3	8,4	7,5	9,8	9,1	8,5	7,9	7,2	6,5	5,9	5,2	5,6	5,2	4,8	4,4	4 »	3,9	3,4	2,8
	25	12,9	11,8	11 »	10,2	9,5	8,5	7,7	6,9	»	»	»	»	»	»	»	»	5,2	4,8	4,3	4,1	3,6	3,3	2,9	2,5
m0,050	10	25,7	24,3	22,4	20,9	19 »	17,5	15,7	14,1	18,6	17,5	16,2	14,8	13,6	12,4	11,1	9,9	10,9	10,3	9,7	8,9	8,2	7,4	6,8	5,9
	15	23,6	22,4	20,9	19,2	17,6	16,3	14,6	13,2	16,9	15,9	14,7	13,5	12,2	11,1	10 »	8,8	9,5	9 »	8,4	7,7	7 »	6,5	5,7	5 »
	20	22 »	20,8	19,5	18,2	16,7	15,3	13,7	12,4	15,6	14,7	13,6	12,5	11,4	10,1	8,9	8 »	8,9	8,4	7,7	7 »	6,5	5,9	5,3	4,5
	25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0m,040	10	32,7	30,8	28,7	26,5	24,4	22,1	20 »	17,8	23 »	21,5	20 »	18,5	16,9	15,2	13,6	12,3	13,5	12,7	11,8	11 »	10,1	9,3	8,3	7,3
	15	30,5	28,7	26,7	24,8	22,8	20,7	18,7	16,8	20,6	19,2	18 »	16,5	15,2	13,7	12,3	11 »	12 »	11,2	10,5	9,7	8,9	8 »	7,2	6,3
	20	29 »	27,2	25,4	23,5	21,7	19,6	17,7	15,8	19,3	18 »	16,7	15,6	14,1	12,7	11,2	10,1	11 »	10,4	9,6	9 »	8,2	7,5	6,8	6 »
	25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0m,020	10	51,9	49 »	45,7	42,3	39 »	35,8	32,4	29,2	41,2	38,7	36,1	33,3	30,6	27,7	24,8	22,1	25,4	23,9	22,3	20,8	19,1	17,4	15,8	14 »
	15	50 »	47,2	44,2	40,8	37,7	34,4	31 »	27,7	38,8	36,4	33,7	31,2	28,5	25,8	22,8	20,5	23,6	22,3	20,8	19,1	17,6	16 »	14,6	13 »
	20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Le tableau qui précède permet de déterminer d'un coup d'œil de quelle valeur s'élève la température de l'air qui traverse un tube maintenu extérieurement à une température donnée: pour en rendre l'emploi plus facile en vue de l'étude de la première des deux questions que nous nous sommes posées (Voir page 530), nous avons jugé indispensable de le transformer en y introduisant un élément nouveau, à savoir le faisceau tubulaire, que nous avons supposé constitué par des tubes de même diamètre disposés en files perpendiculaires, et espacés de $0^m,011$ mesurés de la surface intérieure d'un tube à la surface intérieure du tube voisin, comme l'indique la *fig.* ci-dessous.



Il est facile de s'assurer que le nombre n des tubes d'un faisceau tubulaire ainsi constitué, par mètre carré de surface de plaque tubulaire, est égal à :

$$\frac{1}{(d + 0,011)^2}.$$

Les nouveaux tableaux, dans lesquels a été introduit l'élément n, sont reproduits ci-après. Chacun d'eux se rapporte à une température de condensation différente, entre 100° et 65°; ils font connaître notamment, dans chaque cas, le poids de vapeur condensée à la température choisie par heure et par mètre carré de surface tubulaire, et la surface de plaque nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur à l'heure. Les calculs qui ont permis de déterminer ces éléments sont d'une grande simplicité, et je ne crois pas utile de les indiquer ici.

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 100°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : 1 atm. TABLEAU N° 1.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.
P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : 0m,500						LONGUEUR DES TUBES : 1m,000						LONGUEUR DES TUBES : 1m,500					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2
0,100	81	10	4,5	0,094	0,101	0,000188	55	18,18	8,6	0,094	0,194	0,000361	105	9,52	12,2	0,094	0,275	0,000512	149	6,71
		15	3,8	0,141	0,128	0,000238	69	14,49	7,6	0,141	0,257	0,000478	139	7,19	10,7	0,141	0,362	0,000674	197	5,08
		20	3,4	0,188	0,153	0,000284	83	12,04	6,8	0,188	0,307	0,000571	166	6,02	9,8	0,188	0,442	0,000823	240	4,17
		25	3,4	0,235	0,192	0,000357	104	9,61	6,5	0,235	0,367	0,000683	199	5,02	9,6	0,235	0,541	0,001007	294	3,40
0,075	135	10	7,3	0,053	0,093	0,000173	84	11,90	12,5	0,053	0,159	0,000296	144	6,94	17,1	0,053	0,217	0,000404	196	5,10
		15	6,1	0,079	0,116	0,000216	105	9,52	11 »	0,079	0,208	0,000387	188	5,31	14,8	0,079	0,281	0,000523	254	3,94
		20	5,6	0,106	0,142	0,000264	128	7,81	9,8	0,106	0,249	0,000463	225	4,44	13,4	0,106	0,341	0,000635	309	3,23
		25	5,2	0,132	0,165	0,000307	149	6,71	»	»	»	»	»	»	12,9	0,132	0,409	0,000761	370	2,70
0,050	268	10	10,9	0,023	0,060	0,000111	107	9,34	18,6	0,023	0,103	0,000191	184	5,43	25,7	0,023	0,142	0,000264	255	3,92
		15	9,5	0,035	0,080	0,000148	142	7,04	16,9	0,035	0,142	0,000264	255	3,92	23,6	0,035	0,198	0,000368	355	2,82
		20	8,9	0,047	0,100	0,000186	179	5,58	15,6	0,047	0,176	0,000327	315	3,20	22 »	0,047	0,248	0,000461	445	2,25
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	13,5	0,015	0,049	0,000091	126	7,93	23 »	0,015	0,083	0,000154	213	4,70	32,7	0,015	0,118	0,000219	303	3,30
		15	12 »	0,022	0,063	0,000117	162	6,17	20,6	0,022	0,109	0,000202	279	3,59	30,5	0,022	0,161	0,000299	413	2,42
		20	11 »	0,030	0,079	0,000147	203	4,92	19,3	0,030	0,139	0,000258	357	2,80	29 »	0,030	0,209	0,000389	538	1,86
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	25,4	0,0037	0,0225	0,000041	154	6,49	41,2	0,0037	0,0365	0,000068	255	3,92	51,9	0,0037	0,0460	0,000085	318	3,14
		15	23,6	0,0056	0,0317	0,000059	221	4,52	38,8	0,0056	0,0521	0,000097	363	2,75	50 »	0,0056	0,0672	0,000125	468	2,14
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 95°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},833$. TABLEAU N° 2.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.

P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog	m2
0,100	81	10	4,2	0,094	0,095	0,000175	51	19,60	7,8	0,094	0,176	0,000324	94	10,63	11,4	0,094	0,257	0,000474	138	7,25
		15	3,6	0,141	0,122	0,000225	66	15,15	7,1	0,141	0,240	0,000442	129	7,75	10 »	0,141	0,338	0,000623	182	5,49
		20	3,2	0,188	0,144	0,000265	77	12,99	6,3	0,188	0,284	0,000524	153	6,54	9,3	0,188	0,420	0,000774	226	4,43
		25	3,2	0,235	0,180	0,000332	97	10,31	6,1	0,235	0,344	0,000634	185	5,40	8,9	0,235	0,502	0,000927	270	3.70
0,075	135	10	6,9	0,053	0,088	0,000162	79	12,66	11,5	0,053	0,146	0,000269	131	7,63	16 »	0,053	0,203	0,000374	182	5,49
		15	5,8	0,079	0,110	0,000202	98	10,20	10,3	0,079	0,195	0,000359	174	5,75	13,5	0,079	0,256	0,000472	229	4,37
		20	5,2	0,106	0,132	0,000243	118	8,47	9,1	0,106	0,231	0,000426	207	4,83	12,6	0,106	0,320	0,000590	287	3,48
		25	4,8	0,132	0,152	0,000280	136	7,35	»	»	»	»	»	»	11,8	0,132	0,374	0,000690	335	2,99
0,050	268	10	10,3	0,023	0,057	0,000105	101	9,90	17,5	0,023	0,097	0,000178	172	5,81	24,3	0,023	0,134	0,000247	238	4,20
		15	9 »	0,035	0,076	0,000140	135	7,40	15,9	0,035	0,133	0,000245	236	4,23	22,4	0,035	0,188	0,000346	334	2,99
		20	8,4	0,047	0,095	8,000175	169	5,91	14,7	0,047	0,166	0,000306	295	3,39	20,8	0,047	0,235	0,000433	418	2,39
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	12,7	0,015	0,046	0,000084	116	8,61	21,5	0,015	0,077	0,000142	196	5,10	30,8	0,015	0,111	0,000204	282	3,55
		15	11,2	0,022	0,059	0,000108	149	6,71	19,2	0,022	0,101	0,000186	257	3,89	28,7	0,022	0,151	0,000278	384	2.60
		20	10,4	0,030	0,075	0,000138	191	5,24	18 »	0,030	0,130	0,000239	330	3,03	27,2	0,030	0,196	0,000361	499	2 »
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	23,9	0,0037	0,0212	0,000039	146	6,85	38,7	0,0037	0,0343	0,000063	236	4,23	49 »	0,0037	0,0435	0,000080	300	3,33
		15	22,3	0,0056	0,0299	0,000055	206	4,85	36,4	0,0056	0,0489	0,000090	337	2,97	47,2	0,0056	0,0634	0,000116	434	2,30
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 90°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},691$. TABLEAU N° 3.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondant aux valeurs de m.

P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m²	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m²	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m²
0,100	81	10	3,9	0,094	0,088	0,000160	47	21,28	7,3	0,094	0,165	0,000301	88	11,36	10,5	0,094	0,237	0,000433	126	7,94
		15	3,3	0,141	0,112	0,000204	59	16,95	6,5	0,141	0,220	0,000402	117	8,55	9,1	0,141	0,308	0,000563	164	6,10
		20	3 »	0,188	0,135	0,000246	72	13,88	5,7	0,188	0,257	0,000469	137	7,30	8,5	0,188	0,383	0,000700	204	4,90
		25	3 »	0,235	0,169	0,000308	90	11,11	5,6	0,235	0,315	0,000575	168	5,99	8,2	0,235	0,462	0,000844	246	4,07
0,075	135	10	6,5	0,053	0,083	0,000151	73	13,70	10,6	0,053	0,135	0,000246	120	8,33	14,8	0,053	0,188	0,000343	167	5,99
		15	5,5	0,079	0,104	0,000190	92	10,87	9,5	0,079	0,180	0,000329	160	6,25	12,6	0,079	0,239	0,000436	212	4,72
		20	4,8	0,106	0,122	0,000223	108	9,26	8,5	0,106	0,216	0,000394	191	5,24	12 »	0,106	0,305	0,000557	271	3,69
		25	4,3	0,132	0,136	0,000248	121	8,26	»	»	»	»	»	»	11 »	0,132	0,348	0,000636	309	3,24
0,050	268	10	9,7	0,023	0,053	0,000096	93	10,75	16,2	0,023	0,089	0,000162	156	6,41	22,4	0,023	0,124	0,000226	218	4,59
		15	8,4	0,035	0,070	0,000127	122	8,20	14,7	0,035	0,123	0,000224	216	4,63	20,9	0,035	0,175	0,000319	308	3,25
		20	7,7	0,047	0,087	0,000159	153	6,54	13,6	0,047	0,153	0,000279	269	3,72	19,5	0,047	0,220	0,000402	388	2,58
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	11,8	0,015	0,0424	0,000077	106	9,43	20 »	0,015	0,072	0,000131	181	5,53	28,7	0,015	0,103	0,000188	260	3,85
		15	10,5	0,022	0,0554	0,000101	140	7,14	18 »	0,022	0,095	0,000173	239	4,20	26,7	0,022	0,141	0,000257	355	2,82
		20	9,6	0,030	0,0691	0,000126	174	5,75	16,7	0,030	0,120	0,000219	303	3,30	25,4	0,030	0,183	0,000334	462	2,16
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	22,3	0,0037	0,0198	0,000036	135	7,44	36,1	0,0037	0,0320	0,000058	217	4,61	45,7	0,0037	0,0405	0,000074	277	3,61
		15	20,8	0,0056	0,0279	0,000051	191	5,24	33,7	0,0056	0,0452	0,000082	307	3,26	44,2	0,0056	0,0594	0,000108	404	2,48
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 85°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},569$. TABLEAU N° 4.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.

P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2
0,100	81	10	3,6	0,094	0,081	0,000146	43	23,26	6,7	0,094	0,151	0,000273	80	12,5	9,7	0,094	0,219	0,000396	115	8,70
		15	3 »	0,141	0,101	0,000182	53	18,87	6,1	0,141	0,206	0,000373	109	9,17	8,5	0,141	0,288	0,000521	152	6,58
		20	2,7	0,188	0,122	0,000221	64	15,62	5,3	0,188	0,239	0,000432	126	7,94	7,9	0,188	0,356	0,000644	188	5,32
		25	2,7	0,235	0,152	0,000275	80	12,50	5,1	0,235	0,288	0,000521	152	6,58	7,6	0,235	0,429	0,000776	226	4,43
0,075	135	10	6 »	0,053	0,076	0,000137	67	14,93	9,7	0,053	0,123	0,000222	108	9,26	13,7	0,053	0,174	0,000315	153	6,54
		15	5 »	0,079	0,095	0,000172	84	11,90	8,8	0,079	0,167	0,000302	147	6,80	11,8	0,079	0,224	0,000405	197	5,08
		20	4,4	0,106	0,112	0,000202	98	10,20	7,9	0,106	0,201	0,000364	177	5,65	11,1	0,106	0,282	0,000510	248	4,03
		25	4,1	0,132	0,130	0,000235	114	8,77	»	»	»	»	»	»	10,2	0,132	0,323	0,000585	284	3,52
0,050	268	10	8,9	0,023	0,049	0,000088	85	11,77	14,8	0,023	0,082	0,000148	143	6,99	20,9	0,023	0,115	0,000208	201	4,98
		15	7,7	0,035	0,065	0,000117	113	8,85	13,5	0,035	0,113	0,000204	197	5,08	19,2	0,035	0,161	0,000291	281	3,56
		20	7 »	0,047	0,079	0,000143	138	7,25	12,5	0,047	0,141	0,000255	246	4,06	18,2	0,047	0,205	0,000371	358	2,79
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	11 »	0,015	0,0396	0,000071	98	10,20	18,5	0,015	0,067	0,000121	167	5,99	26,5	0,015	0,095	0,000172	238	4,20
		15	9,7	0,022	0,0512	0,000092	127	7,87	16,5	0,022	0,087	0,000157	217	4,60	24,8	0,022	0,131	0,000237	328	3,05
		20	9 »	0,030	0,0648	0,000117	162	6,17	15,6	0,030	0,112	0,000202	279	3,58	23,5	0,030	0,169	0,000306	423	2,36
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	20,8	0,0037	0,0184	0,000033	124	8,07	33,3	0,0037	0,0295	0,000053	198	5,05	42,3	0,0037	0,0375	0,000067	251	3,98
		15	19,1	0,0056	0,0256	0,000046	172	5,81	31,2	0,0056	0,0419	0,000075	281	3,56	40,8	0,0056	0,0548	0,000099	371	2,70
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 80°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},466$. TABLEAU N° 5.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.
P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t-\theta$	p	m	Π	P	S	$t-\theta$	p	m	Π	P	S	$t-\theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilogr.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2
0,100	81	10	3,3	0,094	0,074	0,000132	38	26,32	6 »	0,094	0,135	0,000242	71	14,08	8,9	0,094	0,201	0,000360	105	9,52
		15	2,7	0,141	0,091	0,000163	48	20,83	5,5	0,141	0,186	0,000333	97	10,30	7,6	0,141	0,257	0,000461	134	7,46
		20	2,4	0,188	0,108	0,000193	56	17,86	4,9	0,188	0,221	0,000396	115	8,69	7,2	0,188	0,325	0,000583	170	5,88
		25	2,4	0,235	0,135	0,000242	71	14,09	4,5	0,235	0,254	0,000456	133	7,51	7 »	0,235	0,395	0,000709	207	4,83
0,075	135	10	5,5	0,053	0,070	0,000125	61	16,39	8,8	0,053	0,112	0,000201	98	10,20	12,5	0,053	0,159	0,000285	139	7,19
		15	4,5	0,079	0,085	0,000152	74	13,51	8 »	0,079	0,152	0,000272	132	7,57	10,6	0,079	0,201	0,000360	175	5,71
		20	4 »	0,106	0,102	0,000183	89	11,24	7,2	0,106	0,183	0,000328	159	6,29	10,1	0,106	0,257	0,000461	224	4,46
		25	3,6	0,132	0,114	0,000204	99	10,10	»	»	»	»	»	»	9,5	0,132	0,301	0,000540	262	3,81
0,050	268	10	8,2	0,023	0,045	0,000080	77	12,99	13,6	0,023	0,075	0,000134	129	7,76	19 »	0,023	0,105	0,000188	181	5,52
		15	7 »	0,035	0,059	0,000105	101	9,90	12,2	0,035	0,102	0,000183	177	5,65	17,6	0,035	0,148	0,000265	256	3,90
		20	6,5	0,047	0,073	0,000131	126	7,94	11,4	0,047	0,128	0,000229	221	4,52	16,7	0,047	0,188	0,000337	325	3,07
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	10,1	0,015	0,036	0,000064	88	11,36	16,9	0,015	0,061	0,000109	151	6,62	24,4	0,015	0,088	0,000157	217	4,60
		15	8,9	0,022	0,047	0,000084	116	8,62	15,2	0,022	0,080	0,000143	198	5,05	22,8	0,022	0,120	0,000215	297	3,36
		20	8,2	0,030	0,059	0,000105	145	6,89	14,1	0,030	0,101	0,000181	250	4 »	21,7	0,030	0,156	0,000280	387	2,55
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	19,1	0,0037	0,0169	0,000030	112	8,93	30,6	0,0037	0,0271	0,000048	180	5,55	39 »	0,0037	0,0346	0,000062	232	4,32
		15	17,6	0,0056	0,0236	0,000042	157	6,37	28,5	0,0056	0,0383	0,000068	255	3,92	37,7	0,0056	0,0506	0,000090	337	2,96
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 75°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : 0m,379. TABLEAU N° 6.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.

P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : 0m,500						LONGUEUR DES TUBES : 1m,000						LONGUEUR DES TUBES : 1m,500					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2
0,100	81	10	3,1	0,094	0,070	0,000124	36	27,77	5,6	0,094	0,126	0,000224	65	15,38	8,2	0,094	0,185	0,000329	96	10,41
		15	2,5	0,141	0,085	0,000151	44	22,72	4,9	0,141	0,166	0,000295	86	11,62	7 »	0,141	0,237	0,000421	123	8,13
		20	2,2	0,188	0,099	0,000176	51	19,60	4,4	0,188	0,198	0,000352	103	9,70	6,6	0,188	0,298	0,000530	155	6,45
		25	2,2	0,235	0,124	0,000220	64	15,62	4 »	0,235	0,226	0,000402	117	8,54	6,5	0,235	0,367	0,000653	190	5,26
0,075	135	10	5 »	0,053	0,064	0,000113	55	18,18	8 »	0,053	0,102	0,000181	88	11,36	11,3	0,053	0,144	0,000256	124	8,06
		15	4 »	0,079	0,076	0,000135	66	15,15	7,1	0,079	0,135	0,000240	117	8,54	9,8	0,079	0,186	0,000330	160	6,25
		20	3,9	0,106	0,099	0,000176	86	11,62	6,5	0,106	0,165	0,000293	142	7,04	9,3	0,106	0,236	0,000419	204	4,90
		25	3,3	0,132	0.104	0,000185	90	11,11	»	»	»	»	»	»	8,5	0,132	0,269	0,000478	232	4,31
0,050	268	10	7,4	0,023	0,041	0,000072	69	14,49	12,4	0,023	0,068	0,000121	117	8,54	17,5	0,023	0,097	0,000172	166	6,02
		15	6,5	0,035	0,055	0,000097	94	10,63	11,1	0,035	0,093	0,000165	159	6,28	16,3	0,035	0,137	0,000243	234	4,27
		20	5,9	0,047	0,066	0,000117	113	8,85	10,1	0,047	0,114	0,000202	195	5,12	15,3	0,047	0,172	0,000306	295	3,39
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	9,3	0,015	0,0334	0,000059	82	12,19	15,2	0,015	0,055	0,000097	134	7,46	22,1	0,015	0,079	0,000140	194	5,15
		15	8 »	0,022	0,0422	0,000075	104	9,61	13,7	0,022	0,072	0,000128	177	5,65	20,7	0,022	0,109	0,000193	267	3,74
		20	7,5	0,030	0,0540	0,000096	133	7,51	12,7	0,030	0,091	0,000161	223	4,48	19,6	0,030	0,141	0,000250	346	2,89
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	17,4	0,0037	0,0154	0,000027	101	9,90	27,7	0,0037	0,0245	0,000043	161	6,21	35,8	0,0037	0,0317	0,000056	210	4,76
		15	16 »	0,0056	0,0215	0,000038	142	7,01	25,8	0,0056	0,0346	0,000061	228	4,38	34,4	0,0056	0,0462	0,000082	307	3,25
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 70°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},307$. TABLEAU N° 7.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.
P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes d	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t-\theta$	p	m	Π	P	S	$t-\theta$	p	m	Π	P	S	$t-\theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m2
0,100	81	10	2,7	0,094	0,061	0,000107	31	32,25	5 »	0,094	0,113	0,000199	58	17,24	7,3	0,094	0,165	0,000291	85	11,76
		15	2,2	0,141	0,074	0,000130	38	26,31	4,4	0,141	0,149	0,000262	76	13,15	6,4	0,141	0,216	0,000380	111	9 »
		20	2 »	0,188	0,090	0,000158	46	21,73	4 »	0,188	0,180	0,000317	92	10,86	6 »	0,188	0,271	0,000477	139	7,19
		25	2 »	0,235	0,113	0,000199	58	17,24	3,5	0,235	0,197	0,000347	101	9,90	5,8	0,235	0,327	0,000575	168	5,95
0,075	135	10	4,5	0,053	0,057	0,000100	49	20,40	7,2	0,053	0,091	0,000160	78	12,82	10,2	0,053	0,130	0,000229	111	9 »
		15	3,7	0,079	0,070	0,000123	70	16,66	6,4	0,079	0,121	0,000213	104	9,61	9 »	0,079	0,171	0,000301	146	6,84
		20	3,4	0,106	0,086	0,000151	73	13,69	5,9	0,106	0,150	0,000264	128	7,81	8,4	0,106	0,214	0,000377	183	5,45
		25	2,9	0,132	0,092	0,000162	79	12,65	»	»	»	»	»	»	7,7	0,132	0,244	0,000430	209	4,78
0,050	268	10	6,8	0,023	0,0375	0,000066	64	15,62	11,1	0,023	0,061	0,000107	103	9,70	15,7	0,023	0,087	0,000153	148	6,75
		15	5,7	0,035	0,048	0,000084	81	12,34	10 »	0,035	0,084	0,000148	143	6,99	14,6	0,035	0,123	0,000216	208	4,80
		20	5,3	0,047	0,060	0,000105	101	9,90	8,9	0,047	0,100	0,000176	170	5,88	13,7	0,047	0,154	0,000271	261	3,83
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	8,3	0,015	0,030	0,000053	73	13,69	13,6	0,015	0,049	0,000086	119	8,40	20 »	0,015	0,072	0,000127	176	5,68
		15	7,2	0,022	0,038	0,000067	93	10,75	12,3	0,022	0,065	0,000114	158	6,32	18,7	0,022	0,099	0,000174	241	4,14
		20	6,8	0,030	0,050	0,000088	122	8,19	11,2	0,030	0,081	0,000142	196	5,10	17,7	0,030	0,127	0,000224	310	3,22
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	15,8	0,0037	0,0140	0,000025	94	10,63	24,8	0,0037	0,0220	0,000038	142	7,04	32,4	0,0037	0,0287	0,000050	187	5,34
		15	14,6	0,0056	0,0196	0,000034	127	7,87	22,8	0,0056	0,0306	0,000053	198	5,05	31 »	0,0056	0.0416	0,000073	273	3,66
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TEMPÉRATURE DE CONDENSATION : 65°. — FORCE ÉLASTIQUE CORRESPONDANTE : $0^{atm},246$. TABLEAU N° 8.

$t - \theta$ Excès de température gagné par l'air.
p Poids d'air débité par tube et par seconde.
m Chaleur évacuée par tube et par seconde.
Π Vapeur condensée correspondante aux valeurs de m.

P Vapeur condensée par heure et par mètre carré de plaque tubulaire du condenseur.
S Surface de plaque tubulaire nécessaire à la condensation de 1.000 kilogrammes de vapeur par heure.

DIAMÈTRE des tubes b	NOMBRE de tubes au mètre carré n	VITESSE de l'air par seconde V	LONGUEUR DES TUBES : $0^m,500$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,000$						LONGUEUR DES TUBES : $1^m,500$					
			$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S	$t - \theta$	p	m	Π	P	S
		mètres	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m²	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilog.	m²	degrés	kilog.	calories	kilog.	kilogr.	m²
0,100	81	10	2,3	0,094	0,052	0,000099	29	34,49	4,3	0,094	0,097	0,000169	49	20,40	6,5	0,094	0,147	0,000257	75	13,33
		15	1,9	0,141	0,064	0,000111	32	31,25	3,8	0,141	0,128	0,000223	65	15,38	5,8	0,141	0,196	0,000342	100	10 »
		20	1,8	0,188	0,081	0,000141	41	24,39	3,5	0,188	0,158	0,000276	80	12,50	5,2	0,188	0,235	0,000410	120	8,33
		25	1,7	0,235	0,096	0,000167	49	20,40	3 »	0,235	0,169	0,000295	86	11,62	5,1	0,235	0,288	0,000503	147	6,80
0,075	135	10	3,9	0,053	0,050	0,000087	42	23,80	6,5	0,053	0,083	0,000145	70	14,28	9,2	0,053	0,117	0,000204	99	10,10
		15	3,2	0,079	0,060	0,000104	51	19,60	5,7	0,079	0,108	0,000187	91	10,98	8 »	0,079	0,152	0,000265	129	7,75
		20	2,8	0,106	0,071	0,000124	60	16,66	5,2	0,106	0,132	0,000230	112	8,92	7,5	0,106	0,191	0,000333	162	6,17
		25	2,5	0,132	0,079	0,000138	67	14,92	»	»	»	»	»	»	6,9	0,132	0,218	0,000381	185	5,40
0,050	268	10	5,9	0,023	0,032	0,000055	53	18,86	9,9	0,023	0,055	0,000096	93	10,75	14,1	0,023	0,078	0,000136	131	7,63
		15	5 »	0,035	0,042	0,000073	70	14,28	8,8	0,035	0,074	0,000129	124	8,06	13,2	0,035	0,111	0,000194	187	5,34
		20	4,5	0,047	0,051	0,000089	86	11,62	8 »	0,047	0,090	0,000157	151	6,62	12,4	0,047	0,140	0,000244	235	4,25
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,040	384	10	7,3	0,015	0,026	0,000045	62	16,12	12,3	0,015	0,044	0,000076	105	9,52	17,8	0,015	0,064	0,000111	153	6,53
		15	6,3	0,022	0,033	0,000057	79	12,65	11 »	0,022	0,058	0,000101	140	7,14	16,8	0,022	0,089	0,000155	214	4,67
		20	6 »	0,030	0,043	0,000075	104	9,61	10,1	0,030	0,073	0,000127	176	5,68	15,8	0,030	0,114	0,000199	275	3,63
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,020	1.040	10	14 »	0,0037	0,0124	0,000021	79	12,65	22,1	0,0037	0,0196	0,000034	127	7,87	29,2	0,0037	0,0259	0,000045	168	5,95
		15	13 »	0,0056	0,0174	0,000030	112	8,92	20,5	0,0056	0,0275	0,000048	180	5,55	27,7	0,0056	0,0372	0,000065	243	4,11
		20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Application à l'étude d'un condenseur à air pour locomotives. — L'usage de ces tableaux va nous permettre de répondre immédiatement à la première question posée au commencement de ce travail.

Prenons, pour fixer les idées, le cas d'une locomotive dépensant 7.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, et recherchons les dimensions du faisceau tubulaire à employer pour condenser ce poids de vapeur (*) et le ramener à la température de 65° correspondant à une dépression, au condenseur, de 3/4 d'atmosphère. Supposons, d'un autre côté, que nous fassions circuler l'air dans le faisceau à la vitesse de 15 mètres par seconde.

L'examen du tableau n° 8, qui correspond à la température de condensation de 65°, montre immédiatement que le volume du condenseur devra être de $7 \times 31{,}25 \times 0{,}5 = 109$ mètres cubes, si le faisceau est formé de tubes de $0^{m},100$ de diamètre et de $0^{m},500$ de longueur.

On trouverait de même, pour le volume du condenseur :

69 mètres cubes	pour le diamètre de	0,075	et la longueur de	$0^{m},500$
50	d°	0,050	d°	0 ,500
44	d°	0,040	d°	0 ,500
31	d°	0,020	d°	0 ,500

En adoptant la longueur de 1 mètre, le volume nécessaire serait de :

108 mètres cubes	pour un faisceau	de tubes de	$0^{m},100$	de diamètre
77	d°	d°	0 ,075	d°
56	d°	d°	0 ,050	d°
50	d°	d°	0 ,040	d°
39	d°	d°	0 ,020	d°

(*) La transmission de la chaleur à travers les parois du faisceau tubulaire se fait ici de la vapeur à l'air, tandis que, dans les expériences décrites plus haut, elle se faisait de l'eau à l'air. Nous avons admis que la loi de transmission était la même, en raison de ce que cette eau était constamment maintenue en mouvement par le fonctionnement de l'agitateur à palettes établi dans la caisse B (Pl. XV).

(Voir *Traité de Physique industrielle*, par L. Ser, n°s 119 à 122).

Et, enfin, pour la longueur de $1^m,500$, ce volume deviendrait :

105 mètres cubes	pour un faisceau	de tubes de	$0^m,100$
81	d°	d°	0 ,075
56	d°	d°	0 ,050
49	d°	d°	0 ,040
43	d°	d°	0 ,020

Ces tableaux vont nous mettre en mesure de répondre au premier point. Nous supposerons, à cet effet, que nous nous proposons de condenser la vapeur d'échappement, en ramenant sa température à 65° (limite inférieure de nos expériences) ; la dépression au condenseur serait alors sensiblement de 3/4 d'atmosphère. Nous admettrons, en outre que le condenseur est composé de tubes de $1^m,500$, longueur la plus avantageuse, et que la vitesse de l'air est de 15 mètres par seconde ; nous tablerons enfin sur une dépense de 7 mètres cubes d'eau à l'heure.

L'examen des tableaux montre de suite que, suivant le diamètre des tubes, il faudra donner à la surface tubulaire les valeurs ci-après :

Diamètre des tubes	Surface tubulaire
$0^m,10$	$7 \times 10 = 70^{m2}$
0 ,075	$7 \times 7,75 = 54,25$
0 ,05	$7 \times 5,34 = 37,38$
0 ,04	$7 \times 4,67 = 32,69$
0 ,02	$7 \times 4,11 = 28,77$

En supposant le système tubulaire disposé verticalement, il faudrait l'emplacement de deux grands fourgons à bagages pour le loger en entier dans le cas du diamètre de $0^m,04$, un peu moins pour le diamètre de $0^m,02$; quant aux autres diamètres, nous ne nous en occuperons pas, en raison de l'exagération de surface de plaque qu'ils exigeraient.

En admettant que les tubes aient une épaisseur de 1 millimètre et soient en laiton, il est facile de calculer que le poids du faisceau serait de 19 tonnes environ pour le diamètre de $0^m,04$, et de 22 tonnes 1/2 pour le diamètre de $0^m,02$.

Quelle est maintenant la force nécessaire pour faire circuler l'air à travers les tubes constituant le condenseur ?

Nous ne ferons de cet élément qu'une recherche très approximative, mais qui sera néanmoins suffisante dans l'espèce, comme on pourra le voir.

Prenons d'abord le cas du diamètre de $0^m,04$ et faisons une application de la formule :

$$V = \sqrt{\frac{2gP}{1 + \frac{0,024L}{D}}},$$

que nous avons déjà eu l'occasion d'employer ; on en tire :

$$P = \frac{V^2}{2g}\left(1 + \frac{0,024L}{D}\right).$$

Faisons $V = 15$, $g = 9,8088$, $L = 1,5$, et $D = 0,04$, et nous trouverons :

$$P = 22 \text{ mètres.}$$

P est une charge exprimée en colonne d'air. Pour la ramener à une charge h en colonne d'eau (la température de l'air étant supposée de 10°), il faut écrire l'équation :

$$h = \frac{P \times 0,0013}{1 + 10 \times 0,00367},$$

dans laquelle 0,0013 est la densité de l'air, et 0,00367,

son coefficient de dilatation. On en tire :

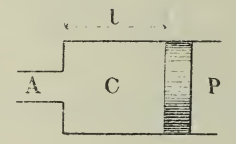
$$h = 0^m{,}028.$$

De même, pour le diamètre de $0^m{,}02$, le calcul fournit

$$h = 0^m{,}040.$$

On peut alors, comme suit, se rendre compte du travail qui sera absorbé pour assurer la circulation de l'air dans le faisceau tubulaire.

Admettons que l'appareil soufflant consiste simplement en un piston P de section s refoulant à la conduite A l'air contenu dans le cylindre C.



La résistance rencontrée par le piston sera égale à $1.000sh$ kilogrammes, et le travail développé pour mettre en circulation le volume d'air sl aura pour valeur $1.000sh \times l$ kilogrammètres, soit $1.000h$ par mètre cube d'air, ou encore $\frac{1000h}{1{,}3}$ par kilogramme.

Si nous appliquons cette expression au cas des tubes de 0,04, nous trouvons un travail de :

$$\frac{1.000 \times 0{,}028}{1{,}3} = 21 \text{ kilogrammètres par kilogramme d'air.}$$

Or, par seconde, à la vitesse de 15 mètres, chaque tube de 0,04 débite (Voir les tableaux) $0^{kg}{,}022$ d'air, et le nombre des tubes du condenseur est de $32{,}69 \times 384$. Le poids total de l'air débité par seconde est en conséquence

de $32,69 \times 384 \times 0,022$, soit 276 kilogrammes d'air, qui exigeront, pour leur circulation, une dépense de travail de $276 \times 21 = 5.796$ kilogrammètres, ou encore 77 chevaux.

Un calcul analogue fournirait, pour le condenseur à tubes de $0^m,02$, 69 chevaux.

Ces chiffres théorique devraient être, bien entendu, majorés dans une notable proportion, au moins doublés, pour se rapprocher de la réalité, et on peut dire, sans crainte d'être taxé d'exagération, que c'est une fraction égale à douze ou quinze centièmes de la puissance de la machine qui devrait être employée à l'envoi de l'air frais dans le condenseur. Il y a encore lieu de considérer que l'appareil soufflant aurait à assurer le tirage du foyer, soit à faire passer dans le faisceau tubulaire de la chaudière une vingtaine de kilogrammes d'air par seconde.

L'application d'un condenseur à air aux locomotives se traduirait donc par une perte de puissance que nous venons d'évaluer à 12 ou 15 p. 100. Elle aurait encore pour conséquence de comporter l'adjonction aux locomotives : 1° d'un appareil tubulaire d'un volume énorme et d'un poids de 30 à 35 tonnes, en y comprenant les châssis sur roues nécessaires pour le porter ; 2° d'un appareil soufflant qui serait également fort encombrant, puisqu'il aurait pour fonction de refouler dans le condenseur proprement dit un volume d'air de 200 mètres cubes par seconde.

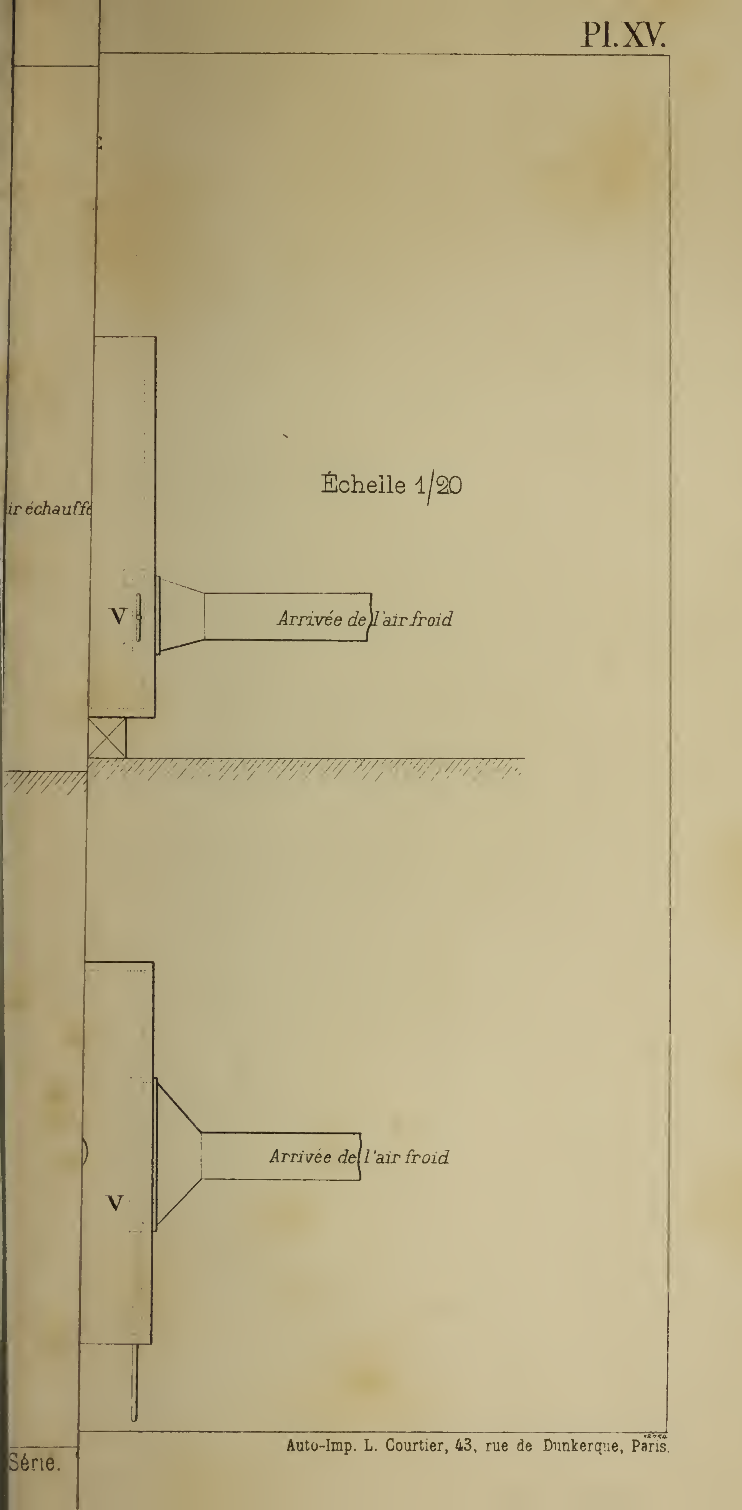
On peut même se demander si un tel appareil soufflant pourrait être établi.

La turbine d'un ventilateur à force centrifuge débitant un tel volume et marchant à la vitesse de 200 tours par minute devrait avoir au moins 5 mètres de diamètre, ce qui permet de se figurer le volume total qu'il occuperait ; ce serait un monument qu'un train ne saurait emmener. Quant à l'emploi d'un souffleur à piston, il serait tout à fait irréalisable, attendu que l'appareil devrait comporter

un volume total de cylindres soufflants de 400 mètres cubes (en supposant quinze coups de piston aller et retour par minute).

Conclusion. — Il est hors de doute que de pareils inconvénients équivalent à autant d'impossibilités et ne sauraient, même de bien loin, entrer en balance avec le faible avantage que pourrait donner la condensation, appliquée aux locomotives. On peut affirmer, sans crainte d'erreur, qu'il n'y a rien à chercher dans cette voie pour l'amélioration de ce genre de machines.

Paris, décembre 1895.



Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉCHAUFFEMENT DE L'AIR

PARCOURANT UN TUYAU MAINTENU EXTÉRIEUREMENT A UNE TEMPÉRATURE DÉTERMINÉE

Appareils d'expérience

Fig. 1. — Élévation.

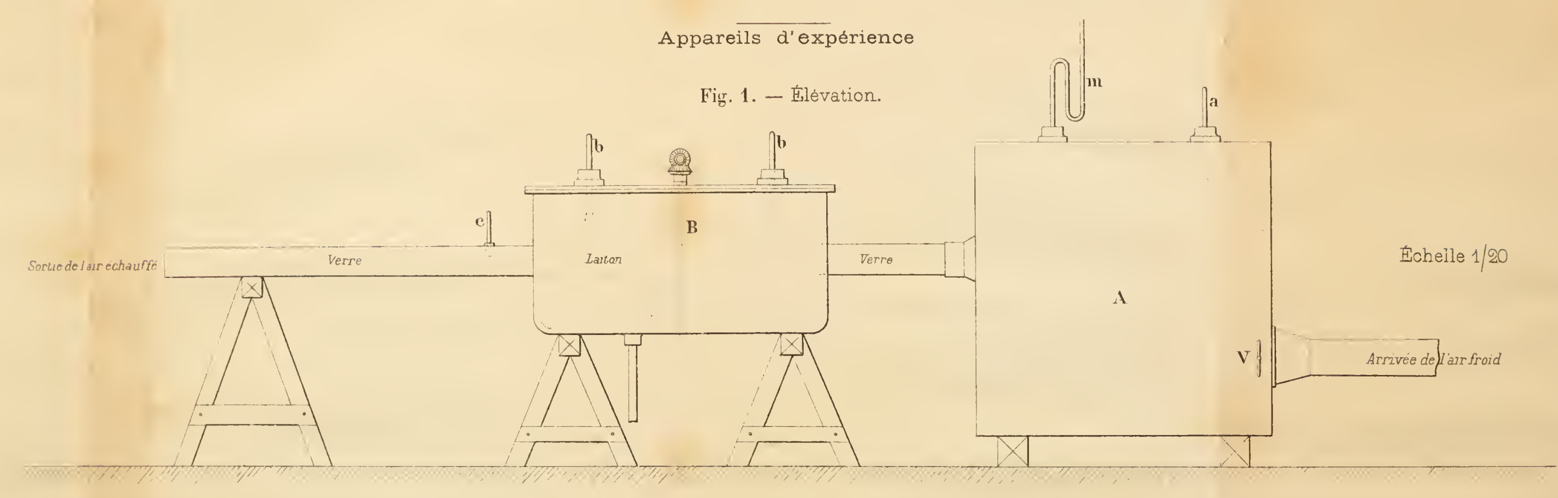


Fig. 2. — Plan.

c₅ c₀ c₀ c₀ c₀

A

Arrivée de l'air froid

V

B

Arrivée de vapeur

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris